ノート

イオン液体を用いた高温超音波キャビテーション ピーニング技術の開発

中川　昌幸*

Study on Ultrasonic Cavitation Peening Applied in an Ionic Liquid at High Temperature

NAKAGAWA Masayuki*

1. 緒　　言

水中におけるキャビテーション崩壊圧を金属材料表面に作用させることにより，表面の塑性変形を誘起し，圧縮残留応力を付与できることが示されている[1)]。キャビテーションは液中における急激な圧力変動により生じることから，液中超音波により容易にキャビテーションを発生させることができる。壊食試験におけるキャビテーション発生法[2)]としては，高速噴流を用いる方法，超音波による方法が代表的なものである。超音波を用いるメリットは，キャビテーション発生が定常的で制御しやすいこと，高圧ポンプなど大規模な装置が不要で，数百 W 程度の低電力で実現可能であること，液温を一定にする程度の液体循環があれば良いため，キャビテーション発生液体の選択にほとんど制限がないことなどが挙げられる。

イオン液体は常温溶融塩とも呼ばれ，常温で液体状態を呈するある種の有機イオンによる塩である[3)]。また，従来の液体とは異なるいくつかの特性を示すことから第 3 の液体とも呼ばれ，産業利用への期待から多くの研究が行われており，電解質としてのキャパシタへの適用は既に実用化されている。その他にも一般的な特性として，揮発性が低いこと，非常に安定で 300℃程度の耐熱性を持つことが知られている。

本研究では，このイオン液体を用いて高温状態での超音波キャビテーションピーニング（以下 USCP と略す）をオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 表面に適用し，マルテンサイト変態を抑制した表面圧縮残留応力付与を試みた。つまり，オーステナイト系ステンレス鋼の典型的な腐食モードである応力腐食割れ（SCC）対策法としての可能性を検討した。

* 研究開発センター

2. 実験方法

2.1 供試材と前処理

供試材には，オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を用い，形状は 30mm ×30mm×t5mm 平板とした。供試材表面は入手状態で機械加工面であり表面が一部マルテンサイト化しているため，大気炉で 1050℃で 50min 保持後水冷し，粒界介在物の固溶化処理および内部ひずみ除去を行った。表面状態を均一化するため，SiC 耐水研磨紙で酸化スケール，加工層除去を行った後 5%シュウ酸水溶液中で電解研磨を行い研磨加工層を除去した。

2.2 検討したイオン液体

本報告では，1−アリル−3−メチルイミダゾリウムテトラフルオロボレート（以下 AMIm-BF4 と略す）の結果を示す。

2.3 実験の概略

図 1 に実験の概略図を示す。19.5kHz の磁歪振動子により発生させた超音波を先端径 φ 25mm のステップ型ホーンにより増幅させる。キャビテーション発生液体は底部に供試材を固

定した金属製容器に入れ，ホーン先端を供試材表面に近接させた。供試材表面とホーン振動面との間の液体で満たされた領域がキャビテーション発生領域となる。イオン液体の温度制御には，シリコンオイルのオイルバスにより行った。

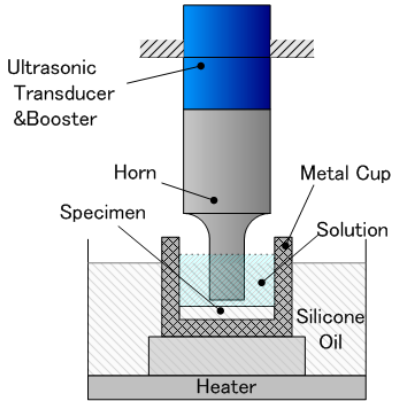

図 1　実験の概略図

表 1　複合サイクル試験の 1 サイクル条件

1	塩水噴霧　40℃　98%RH	20min
2	乾燥　70℃　20%RH	40min
3	高温湿潤　60℃　98%RH	20min

2.4　評価方法

残留応力測定は，γ(220)の V- Kαによる回折ピークの測定により行った。マルテンサイト量の比較には XRD プロファイルのγ(111)とα(110)の面積比を用いた。また，耐食性評価のため複合サイクル試験を行った。比較のため，ピーニングの従来法のひとつであるウエットブラスト(以下 WB と略す)処理表面を同様の前処理後に作成した。表 1 に複合サイクル試験の 1 サイクル条件を示す。ウェットブラストのメディアには 70μm 以下のサイズのジルコニア粒子を用い，2mm/sec で供試材表面を 2 回走査させた。

3.　結果と考察

3.1　表面圧縮残留応力の付与

図 2 に常温の水と 200℃の AMIm-BF4 における超音波キャビテーション照射面の表面残留応力値を示す。処理時間とともに圧縮残留応力値が増加している。常温の水の場合の方が短い処理時間で圧縮残留応力が最大値に達し，その後は残留応力の均一化，深さ方向へのひずみの伝播の影響により，値の変動が見られる。図 3 に USCP 処理面と WB 処理面の表面粗さを示す。WB 処理面粗さに対し，USCP 照射面は粗さの変化が非常に小さいことが確認できる。

3.2　加工誘起マルテンサイト量の変化

オーステナイト系ステンレス鋼において，ピーニング処理を行うことにより圧縮残留応力の付与と当時に加工誘起マルテンサイトを生じ硬化する。しかし，マルテンサイトはオーステナイトよりも耐食性が低いことが知られており，SCC 対策のためのピーニング処理において圧縮残留応力付与と耐食性はトレードオフの関係であると言える。圧縮応力を付与し，かつマル

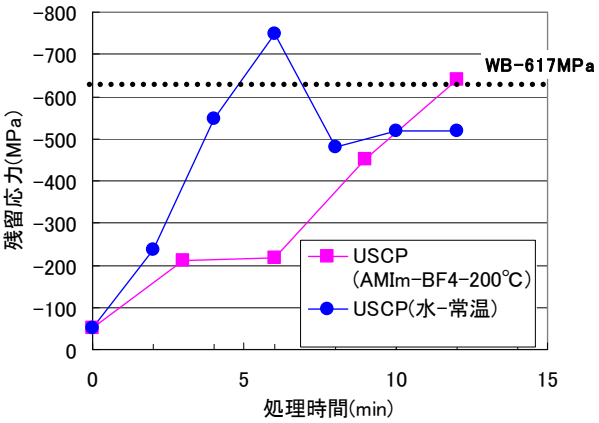

図 2　処理時間による圧縮残留応力の変化

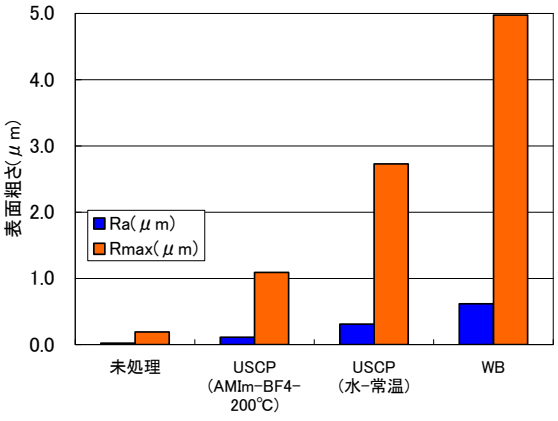

図 3　各ピーニング処理による表面粗さ

テンサイト生成を抑制できれば，より効果的なSCC 対策になると考えられる。図 4 に XRD プロファイルのγ(111)とα(110)の面積比により各ピーニング処理のマルテンサイト変態量を相対的に比較した結果を示す。WB に対し，USCP ではマルテンサイト量は非常に小さく常温の水の場合でも，1/7 以下となった。200℃のAMIm-BF4 の場合はさらにその 1/2 程度のマルテンサイト量であり，マルテンサイト変態の抑制効果が認められた。

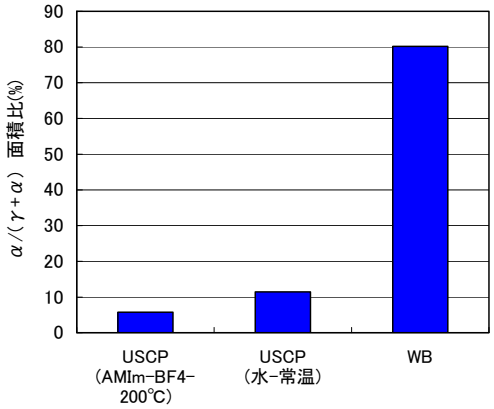

図 4　マルテンサイト量比較

3.3　複合サイクル試験

各ピーニング処理面の実際の耐食性を比較するため表 1 に示したサイクルを合計 342 サイクル行い表面を観察した。観察写真を図 5 に示す。AMIm-BF4，常温水いずれも USCP の場合は WB 表面よりも非常に良好な耐食性を示している。AMIm-BF4，常温水の比較では，若干常温水のほうが腐食領域が小さくなっているが，今回の試験方法では，両者とも腐食の程度が非常に小さく明確な差は見られなかったと考える。

(a) AMIm-BF4 (b)水 -常温　　(c)WB

図 5　複合サイクル試験後の表面観察写真

4.　結　　言

本研究では，200℃に加熱したイオン液体を用い USCP 処理を適用することにより，オーステナイト系ステンレス鋼の圧縮残留応力付与と同時に，従来法である WB 処理以上の耐食性向上を試みた。得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1) 200℃に加熱したイオン液体中においても超音波振動により安定してキャビテーションを発生させることができ，圧縮残留応力付与が確認された。

(2) 200℃に加熱したイオン液体中における USCP では，マルテンサイト変態の抑制が認められ，表面の耐食性向上が期待できる。

(3) 複合サイクル試験では，USCP 処理面は WB 処理面に対し非常に良好な耐食性を示した。しかし，イオン液体と常温水による耐食性の優劣は評価できなかった。

(4) 200℃に加熱したイオン液体中における USCP では，圧縮残留応力付与とマルテンサイト変態抑制の効果が認められるため，電気化学的な腐食と引張残留応力が協調的に腐食を促進させる応力腐食割れ（SCC）の防止効果が期待できる。

なお，本研究は，(独)科学技術振興機構の平成 22 年度研究成果最適展開支援プログラム A-STEP「イオン液体を用いた高温超音波キャビテーションピーニング技術の開発」の一環で実施したものである。

参考文献

1) 中川昌幸，渡辺健彦，“ホーンを介した水中超音波照射による金属材料表面への圧縮残留応力の付与”，溶接学会論文集，22，4，2004，p587-594.

2) 加藤洋治編，“新版　キャビテーション－基礎と最新の進歩－”，槇書店，1999，p196-198.

3) 大野弘幸監修，“イオン液体の開発と展望”，シーエムシー出版，2003，p1-3.